

基于光场二阶关联测量的测距与测姿方法

赵琳琳^{1,2}, 袁梓豪^{1,2}, 孙晓洁^{1,2}, 李明飞^{1,2*}, 刘院省^{1,2}

¹北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;

²中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心, 北京 100094

摘要 远距离高精度的距离测量和目标定姿是航天遥感、目标识别、导航控制等领域的关键技术。从理论和实验上研究了利用热光二阶关联在深菲涅耳衍射区进行测距的方法,测距的精度优于 0.5 mm,并采用原理证明模拟实验验证了利用该测距方法实现测姿的可行性。此方法可作为传统激光测距技术的补充,并可以实现远距离高精度测距。此方法具有可利用恒星等自然光源实现测距与测姿以及对能量等资源需求较少的优点,为卫星定位等空间测距需求提供了一种新的解决方案。

关键词 测量; 二阶关联; 热光; 测距; 测姿; 深菲涅耳衍射区

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1912002

Range and Attitude Measurements Based on Second-Order Correlations of Optical Field

Zhao Linlin^{1,2}, Yuan Zihao^{1,2}, Sun Xiaojie^{1,2}, Li Mingfei^{1,2*}, Liu Yuanxing^{1,2}

¹Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;

²Quantum Engineering Research Center of China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China

Abstract Long-distance and high-precision range and attitude measurements are key technologies in fields such as aerospace remote sensing, target recognition, and navigation control. Here, we theoretically and experimentally study the second-order correlations of the thermal light field for deep Fresnel-zone ranging, and we achieve a precision of 0.5 mm. In addition, we demonstrate with a proof-of-principle simulation experiment that this ranging method can be utilized to measure the target attitude. This method, which can achieve high-precision range measurements over long distances, can be used as a supplement to traditional laser-ranging technology. This method can employ natural light sources such as stars light to measure distance and attitude, and has less demand for energy and other resources. It can provide a new solution for satellite positioning and other space ranging needs.

Key words measurement; second-order correlation; thermal light; ranging; attitude measurement; deep Fresnel zone

OCIS codes 030.6140; 160.2750; 120.6150

1 引 言

远距离高精度测距与测姿技术是导航定位、目标识别和遥感测控等领域的关键技术。近年来,测距与测姿技术受到了越来越多的关注^[1-6],甚至已发展成为衡量国家综合国力的指标之一。目前,基于光学的主动式测距与测姿技术主要利用激光实现^[7-8],它主要利用激光的单色性和相干性好、方向性强等特点来实现高精度的长度、距离、速度、角度等信息的检测。与激光不同,热光具有光子聚束效

应,利用其时间的二阶关联性质可以实现距离测量。2012年,上海交通大学的曾贵华课题组^[9]基于热光的二阶关联测量进行了测距实验,并获得了约 100 mm 的测距精度;随后,曾贵华课题组^[10]采用纠缠光源的二阶关联测量实现了 0.2 mm 的测距精度。上述研究结果表明,基于光场时间的二阶关联性质进行距离测量具有高的测距精度。热光易于获得,利用热光的二阶关联性质进行距离测量具有抗噪声能力强、无死区测量等优点。热光二阶关联曲线具有飞秒量级的半峰全宽^[11]。理论上,热光二阶

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-27; 录用日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805006)

* E-mail: mf_li@sina.cn

关联测距可以提供微米级的测距精度,其高的测距精度可实现对航天器姿态的测量,能满足卫星识别和国防等领域对天基主动光学测距的远距离、高精度要求。在空间中,热光可作为星载测距系统定位的光源,无需额外提供光源,降低了卫星载荷的功耗,因此,热光二阶关联测距为空间测距提供了一个新的解决方案。

不同于文献[9]在时域上利用光纤延时实现二阶关联测距,本文从理论上研究了在自由空间深菲涅耳衍射区进行热光二阶关联测距的特点。此区域的纵向相干距离较短,可以实现高精度测距。为验证理论分析的正确性,本文搭建了热光源二阶关联测距系统进行验证实验。此外,本文还提出了利用三路热光源实现定姿测量的方法,并针对此测距与测姿技术完成了软件原型的开发,最后利用实验数据验证了软件原型的功能。

本文所提方法适用于空间飞行器的远距离测距与测姿,可对合作目标的空间位置与姿态进行测量,例如可对人造卫星进行定位和定姿,也可以用于卫星编队等。

2 光场的二阶关联函数

用 $E(\mathbf{r}, t)$ 来表示 t 时刻位置 \mathbf{r} 处的光场,则光场强度 $I(\mathbf{r}, t)$ 可以描述为

$$I(\mathbf{r}, t) = E^*(\mathbf{r}, t)E(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

式中: $*$ 为复数的共轭。对于光场中的两个任意时空点 (\mathbf{r}_1, t_1) 和 (\mathbf{r}_2, t_2) , 光场的一阶互相关函数 $G^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t_1, t_2)$ 可以描述为

$$G^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t_1, t_2) = \langle E^*(\mathbf{r}_1, t_1)E(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle, \quad (2)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为求平均值。对于静态光场, $\langle \cdot \rangle$ 代表求系综的平均。若场是各态遍历的,则可用时间的平均来代替系综平均。

与光场的一阶相干性类似,光场的二阶相干性可以用二阶关联函数描述。对于光场中的 4 个任意时空点 (\mathbf{r}_i, t_i) 、 (\mathbf{r}_j, t_j) 、 (\mathbf{r}_k, t_k) 和 (\mathbf{r}_l, t_l) , 经典的二阶关联函数 $G_{ijkl}^{(2)}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_l; t_i, t_j, t_k, t_l)$ 可以描述为

$$G_{ijkl}^{(2)}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \mathbf{r}_k, \mathbf{r}_l; t_i, t_j, t_k, t_l) = \langle E^*(\mathbf{r}_i, t_i)E^*(\mathbf{r}_j, t_j)E(\mathbf{r}_k, t_k)E(\mathbf{r}_l, t_l) \rangle, \quad (3)$$

$i, j, k, l = 1, 2, 3, 4.$

(3)式表示 4 个时空点光场场强的关联。若只考虑两个时空点,即令 $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_l = \mathbf{r}_1, t_i = t_l = t_1, \mathbf{r}_j = \mathbf{r}_k = \mathbf{r}_2, t_j = t_k = t_2$, 则经典的二阶关联函数可以化简为

$$G^{(2)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; t_1, t_2) =$$

$$\langle E^*(\mathbf{r}_1, t_1)E^*(\mathbf{r}_2, t_2)E(\mathbf{r}_2, t_2)E(\mathbf{r}_1, t_1) \rangle = \langle [E^*(\mathbf{r}_1, t_1)E(\mathbf{r}_1, t_1)] [E^*(\mathbf{r}_2, t_2)E(\mathbf{r}_2, t_2)] \rangle = \langle I_1(\mathbf{r}_1, t_1)I_2(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle. \quad (4)$$

归一化的二阶关联函数 $g^{(2)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; t_1, t_2)$ 可以描述为

$$g^{(2)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; t_1, t_2) = \frac{\langle E^*(\mathbf{r}_1, t_1)E^*(\mathbf{r}_2, t_2)E(\mathbf{r}_2, t_2)E(\mathbf{r}_1, t_1) \rangle}{\langle E^*(\mathbf{r}_1, t_1)E(\mathbf{r}_1, t_1) \rangle \langle E^*(\mathbf{r}_2, t_2)E(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle} = \frac{\langle I_1(\mathbf{r}_1, t_1)I_2(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle}{\langle I_1(\mathbf{r}_1, t_1) \rangle \langle I_2(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle}. \quad (5)$$

对于热光,有 $g^{(2)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = 0; t_1 - t_2 = 0) = 2$, 其峰值为 2, 本底为 1。这说明光子倾向于聚集在一起,故称之为光子的聚集现象。归一化的光场二阶关联函数是判断光场是否为经典光场的判据,凡是满足 $g^{(2)}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = 0; t_1 - t_2 = 0) \geq 1$ 不等式的光场称为经典光场,否则为非经典光场。归一化的二阶关联函数也可以描述为

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{G^{(2)}(\tau)}{G^{(2)}(\tau = \infty)}, \quad (6)$$

式中: τ 代表延时, $\tau = t_1 - t_2$ 。

3 强度二阶关联测距

3.1 光场二阶关联测距模型

光场的二阶关联性质通常通过 Hanbury Brown-Twiss (HBT) 实验测量获得^[12-13]。HBT 实验原理如图 1 所示。利用一个光束分束器将入射光分为两路,一路称为信号光路,另一路称为参考光路。两个探测器分别对两路光强信号进行测量,通过两个探测器输出信号的关联计算可以获得光场的二阶关联函数值。由(6)式可知,二阶关联函数的峰值出现在 $\tau = 0$ (即信号光路和参考光路的光到达探测器的时间相等)处。如果信号光路和参考光路的距离不相等,则光子到达两个探测器的时间也不同。假设到达信号光路与参考光路的时间差为 Δt , 则峰值会移动至 $\tau = \Delta t$ 处。若选用分束后的一路光作为本地参考光进行探测,另一路光作为信号光照射物体,然后被探测器探测,则信号光的飞行时间可以根据二阶关联函数的峰值移动进行测量,进而就可以根据飞行时间获得分束器到目标物体的距离 L 。 L 的计算公式为

$$L = \frac{c(\Delta t + t_r)}{2}, \quad (7)$$

式中: L 为目标物体的距离; c 为光速; t_r 为测量得

到的参考光的飞行时间。

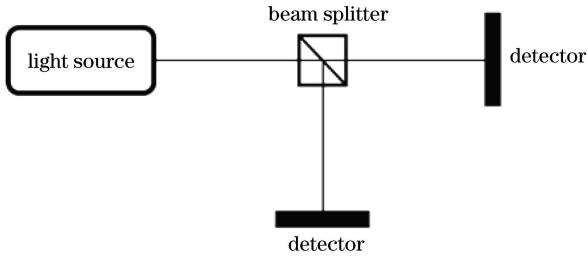


图 1 HBT 实验原理图

Fig. 1 HBT experimental principle

本文利用赝热光作为实验光源,而赝热光源是利用激光打在旋转的毛玻璃上形成动态散斑来获得的^[14]。转动的毛玻璃使光场在时间和空间上都发生涨落,这些涨落服从高斯分布,从而模拟了热光场的统计性质。由文献[15-17]可知赝热光源在光场中传播的散斑场分布具有三维特性,利用(8)~(9)式的距离信息可以将散斑场的传播在纵向上分为三个区域。

$$z_{\text{VCZ}} = D\delta x_0 / \lambda, \quad (8)$$

式中: D 为光源的横向尺寸; λ 为波长; δx_0 为光源平面上散斑的相干尺寸。(8)式是参考 Van Cittert-Zernike(VCZ)定理得到的距离 z_{VCZ} 与光源横向相干尺寸的关系。

$$z_{\text{Fr}} = D^2 / \lambda, \quad (9)$$

式中: z_{Fr} 为菲涅耳距离。

假设 z 为待测面到光源的距离,当 $z \ll z_{\text{VCZ}}$ 时,待测面到光源之间为深菲涅耳衍射区,此时的纵向相干距离 δz_n 可以描述为

$$\delta z_n \sim \pi \frac{\delta x_n^2}{\lambda}, \quad (10)$$

式中: δx_n 为散斑的横向相干距离。在深菲涅耳衍射区,有 $\delta x_n = \delta x_0$,因此由(10)式可以看出,此区域内的纵向相干距离较短,可以实现高精度测距。由(8)式可知,通过调整波长和光源尺寸等,可以使 z_{VCZ} 值为米量级。

当 $z_{\text{VCZ}} < z < z_{\text{Fr}}$ 时,待测面到光源之间为非涅耳衍射区。此时纵向的相干距离 δz_f 可以描述为

$$\delta z_f \sim \frac{\delta x_f^2}{\lambda} \frac{1}{(1 - z/z_{\text{Fr}})}, \quad (11)$$

式中: $\delta x_f = \frac{z\lambda}{D}$ 。在非涅耳衍射区也可获得较短的纵向相干距离和较长的工作距离,但本文暂不考虑此区域,相关内容将另文研究。

3.2 赝热光源二阶关联测距实验

为验证本文方法的有效性搭建了如图 2 所示的实验装置。图 2 中的激光器为氦氖激光器,波长 λ 为 632.8 nm,功率为 2 mW,GCO-200 扩束系统的扩束倍数为 6,毛玻璃的表面粗糙度约为 10 μm 。

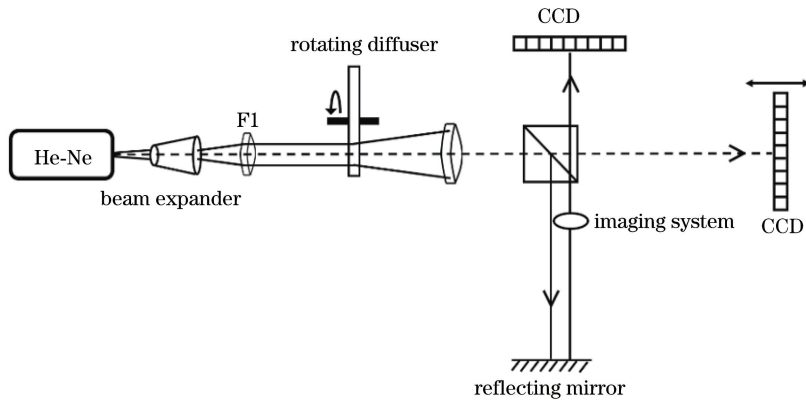


图 2 关联测距实验装置图

Fig. 2 Experimental apparatus diagram of correlation ranging

激光器发出的光束经透镜 F1 准直后被电机控制的旋转毛玻璃调制,毛玻璃调制后的光被透镜准直,然后自由传播约 14 cm 后经过 50:50 的分束器;光束被分束器分为两束,其中一束作为信号光,自由传播约 107 cm 后照射到一个反射物体上,反射光被成像系统成像于电荷耦合元件(CCD)上;另一束光作为参考光,自由传播约 107 cm 后被另一个 CCD 探测。本文利用深菲涅耳衍射区的散斑进行测距,所采

用的赝热光源参数如下:光源的横向尺寸 D 为 0.15 m,光源横向相干长度 δx_0 为 10 μm ,光源波长 λ 为 632.8 nm。利用(8)式计算可得深菲涅耳衍射区的范围为 0~2.37 m,利用(10)式计算可得此区域的纵向相干距离为 0.5 mm,此即为理论测距精度。

在进行测距实验之前,首先在反射物体处放置 CCD 进行系统标定。利用信号臂散斑图中一像素点光强的变化和参考臂记录的散斑图进行关联测

量,获得横向的二阶关联函数分布,取其最高值作为二阶关联函数值;然后以 0.25 mm 为步进量前后平移信号臂上的 CCD(每次关联测量时均采集 500 张强度图),再利用(5)式就可以获得二阶关联函数值与步进距离的关系。测得的归一化二阶关联函数值随步进距离的变化曲线如图 3 所示。

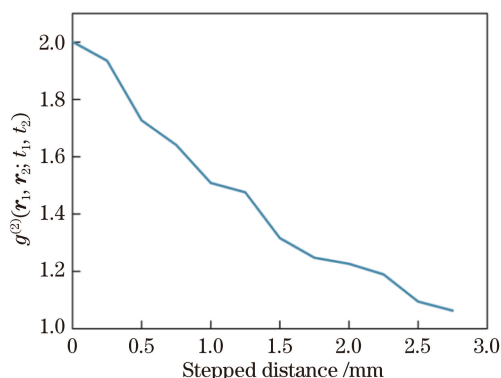


图 3 归一化二阶关联函数值随步进距离的变化

Fig. 3 Variation of normalized second-order correlated function value varying with stepped distance

由图 3 可知:虽然系统设计的归一化二阶关联函数值的半峰全宽为 0.5 mm,但在实际测量中,系统误差、毛玻璃粗糙度误差和光长距离衰减发散等都会导致实际测量的归一化二阶关联函数值的半峰全宽约为 3 mm;在 0.25 mm 的步进量下,随着步进距离增大,归一化二阶关联函数值的变化较大,但仍能够清晰地分辨约 0.25 mm 的移动距离。为提高测距精度,本文利用多项式拟合算法对图 3 中的曲线进行拟合,得到的拟合曲线如图 4 所示。考虑到图 4 是理论计算结果,在图 4 中用虚线标注了步进距离为 0.5 mm 整数倍的位置(0.5 mm 为理论测距精度)。很显然,在图 4 中能够清晰地区分距离变化导致的二阶关联函数值的变化。

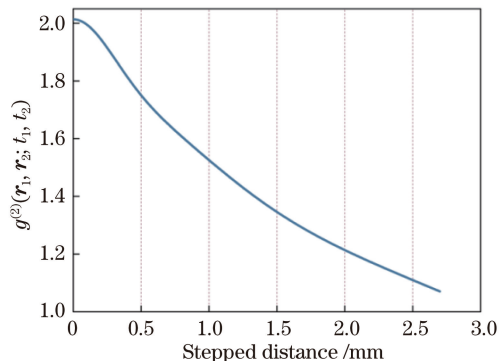


图 4 归一化二阶关联函数值随步进距离变化的拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve of normalized second-order correlated function value varying with stepped distance

在实际测量中利用反射镜作为反射物体,利用一个成像系统将反射镜上的散斑成像在信号光路 CCD 上,选择该 CCD 记录散斑的一个像素点的光强,并将其与参考光路 CCD 记录的散斑进行关联测量,利用图 4 所示归一化二阶关联函数值与步进距离的关系曲线获得物体到参考光路 CCD 的相对距离,根据此相对距离以及参考光路 CCD 到分束器的距离即可获得分束器到目标物体的绝对距离值。

本文随机采集了 6 组实验数据,利用二阶关联测量获得的距离以及实际测量的距离如表 1 所示,其中误差标准差为 0.121 mm,最大误差为 0.22 mm。实验结果表明,赝热光二阶关联测距方法的测距精度优于理论值(0.5 mm)。实验中测得的二阶关联函数的峰值可达 2.0015,接近理论值。同时,采用 0.25 mm 步进量测量的二阶关联函数值的变化也很明显,这说明此测距方法的测量信噪比高。

表 1 基于二阶关联的测距距离与实际距离

Table 1 Measured distance based on second-order correlation and actual distance

Number	Measured distance /mm	Actual distance /mm	Error /mm
1	1070.27	1070.25	0.02
2	1070.58	1070.55	0.03
3	1071.03	1071.15	-0.12
4	1071.33	1071.30	0.03
5	1071.82	1071.60	0.22
6	1071.87	1071.70	0.17

4 测姿方案验证及软件原型

为了便于基于二阶关联测量的测距与测姿系统的使用,基于前文所述原理,本文利用 MATLAB 计算软件编写了测距与测姿软件,软件的用户界面如图 5 所示。“Data Path”为实验采集的散斑存储地址,“Number of Loaded Images”为参与关联运算的散斑图片数量。在中间的对话框中可分别输入参考光路和三路信号光路散斑图中参与运算的强度变化的坐标点,其中:“Reference”代表参考光路,此处输入参与关联运算的散斑图像素的坐标;“a”“b”“c”为三路信号光路,当仅为测距实验时,可仅勾选其中的一个,在测姿实验时,则需勾选三个。此部分参数设置完成后,点击“Input Parameters”。参数设置完成后“Compute”按钮将变亮,点击“Compute”按钮将在右边输出栏“Parameter Information Bar”中显示二阶关联函数值和测距距离。输出计算结果如图 5 所示。

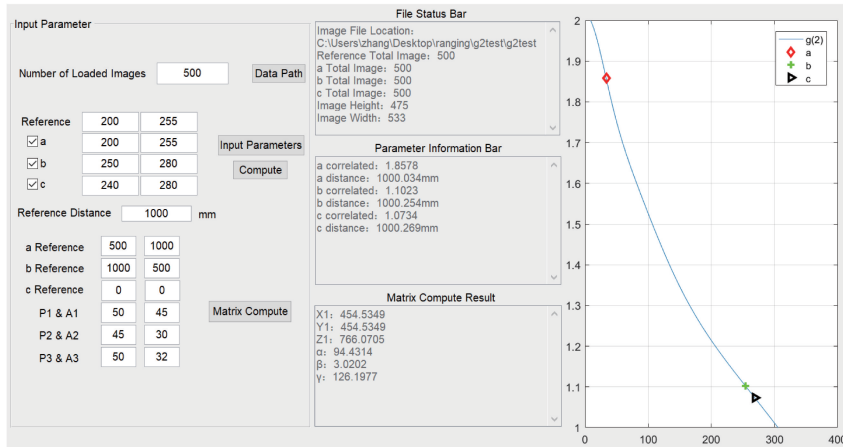


图 5 软件的用户界面

Fig. 5 User interface of our software

在定姿测量方面,对于目标全姿态的测量需要 6 个自由度,即: X_1 、 Y_1 、 Z_1 坐标和绕三个轴的转角 α 、 β 、 γ ,因此至少需要三个跟踪测量站 (a 、 b 、 c) 同时跟踪测量目标上位置相互固定的三个被测点 (A 、 B 、 C) 的坐标。本文利用文献[18]所述的定姿测量原理,在一个测量站 a 上建立绝对坐标系,预先标定被测目标上三个固定被测点 (A 、 B 、 C) 的相互位置关系,在被测目标上建立相对坐标系。被测点 A 为相对坐标系原点,被测点 B 位于相对坐标系的 X 轴上,被测点 C 位于相对坐标系的 X - Y 平面上。同时,预先标定三个测量站的相互位置坐标,建立测量站 b 与测量站 c 到绝对坐标系(即测量站 a) 的齐次变换矩阵。经过齐次变换可以得到测量站 b 与测量站 c 在绝对坐标系下的坐标。用测量站 a 跟踪测量被测点 A ,测量站 b 跟踪测量被测点 B ,测量站 c 跟踪测量被测点 C ,分别在三个测量站上采用二阶关联测距法测量被测点到测量站的距离,即 L_1 、 L_2 、 L_3 。测量站到测量点的距离向量在 x - y 平面上的投影与 x 轴的夹角为 A_i ($i=1,2,3$),与 x - y 平面的夹角为 P_i 。通过测量 L_1 、 P_1 、 A_1 可以获得被测点 A 在绝对坐标系中的坐标,进而经过测量和齐次变换就可以得到被测点 B 和 C 在绝对坐标系下的坐标,再根据被测点 (A 、 B 、 C) 在绝对坐标系下的绝对坐标就可以计算出目标的姿态,实现目标物体姿态的测量。测姿示意图如图 6 所示。

具体姿态测量过程如下:

设测量站测量的被测点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 则

$$\begin{cases} x_i = L_i \cos(P_i) \cos(A_i) \\ y_i = L_i \cos(P_i) \sin(A_i) \\ z_i = L_i \sin(P_i) \end{cases}, \quad (12)$$

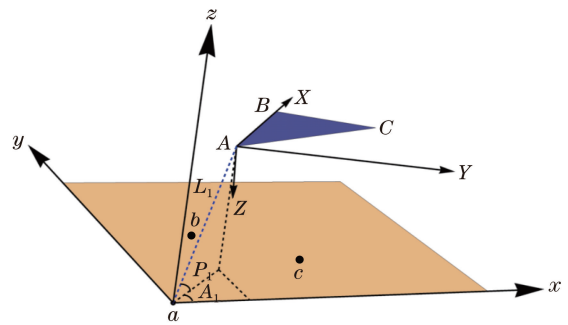


图 6 测姿示意图

Fig. 6 Diagram of attitude measurement

式中: $i = 1, 2, 3$; 测量站测量的被测点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , $i=1$ 对应被测点 A (即 $x_1 = X_1, y_1 = Y_1, z_1 = Z_1$), $i=2$ 对应被测点 B , $i=3$ 对应被测点 C ; L_i 为采用二阶关联测距方法测量的被测点到测量站的距离; A_i 为距离向量在 x - y 平面上的投影与 x 轴的夹角; P_i 为距离向量与 x - y 平面的夹角。

测量站 b ($i=2$) 和 c ($i=3$) 到测量站 a 的齐次变换矩阵为

$$\text{Trans}(a_i, b_i, c_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & b_i \\ 0 & 0 & 1 & c_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i = 2, 3, \quad (13)$$

式中: a_i, b_i, c_i 为齐次变换矩阵参数。被测点 B 和 C 在绝对坐标系中的坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) , 且

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Trans}(a_i, b_i, c_i) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i = 2, 3. \quad (14)$$

由文献[18]可得相对坐标系的三个坐标轴的单位向

量 \mathbf{u} 、 \mathbf{v} 、 \mathbf{w} 在绝对坐标系中的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{u} = \frac{\mathbf{AB}}{|\mathbf{AB}|} \\ \mathbf{v} = \frac{\mathbf{AC} \times \mathbf{AB}}{|\mathbf{AC} \times \mathbf{AB}|} \\ \mathbf{w} = \mathbf{u} \times \mathbf{v} \end{cases}, \quad (15)$$

式中: $\mathbf{AB} = (X_2 - X_1, Y_2 - Y_1, Z_2 - Z_1)$, $\mathbf{AC} = (X_3 - X_1, Y_3 - Y_1, Z_3 - Z_1)$ 。

由文献[18]所述方法计算可得目标绕坐标轴 x 、 y 、 z 的转角 α 、 β 、 γ , 从而可以得出目标姿态 $(X_1, Y_1, Z_1, \alpha, \beta, \gamma)$ 。转角的计算公式为

$$\begin{cases} \alpha = \arccos\left(\frac{w_z}{\sqrt{1-u_z^2}}\right) \\ \beta = \arccos\left(\sqrt{1-u_z^2}\right), \\ \gamma = \arccos\left(\frac{u_x}{\sqrt{1-u_z^2}}\right) \end{cases}, \quad (16)$$

式中: w_z 为向量 \mathbf{w} 在绝对坐标系 z 方向的分量; u_z 为向量 \mathbf{u} 在绝对坐标系 z 方向的分量; u_x 为向量 \mathbf{u} 在绝对坐标系 x 方向的分量。

在姿态测量中, 在“Input Parameters”最下端“a Reference”“b Reference”“c Reference”处分别输入测量站 b 和测量站 c 到测量站 a 的齐次变换矩阵参数, 并输入旋转角 P_i 、 A_i 即可计算被测目标的姿态。姿态的 6 个坐标将在“Matrix Compute Result”中显示, 如图 5 所示。

5 结 论

本文介绍了一种基于光场二阶关联测量的测距与测姿方法, 并利用赝热光源进行了原理验证实验, 实验的测距距离大于 1 m, 测距精度小于理论值 (0.5 mm), 达到了 0.22 mm。同时, 为方便测距与测姿的进行, 开发了一款基于关联测量的测距与测姿软件, 该软件可配合此测距方法使用, 实现快速的实验数据处理。

利用热光的二阶关联性质进行测距提供了一种非相干光测距方法, 此方法可作为激光测距技术的补充, 可应用于远距离高精度测距以及利用自然光源测距等情况, 在导航、地理测量和国土安全等领域具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [2] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3: 351-356.
- [3] Pierce R, Leitch J, Stephens M, et al. Intersatellite range monitoring using optical interferometry [J]. Applied Optics, 2008, 47(27): 5007-5018.
- [4] Xie G C, Ye Y D, Li J M, et al. Echo characteristic and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610001. 谢庚承, 叶一东, 李建民, 等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610001.
- [5] An N, Chen Y F, Liu C Z, et al. Maximum detection range of satellite laser ranging system based on characteristic of laser transmission in atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0901003. 安宁, 陈煜丰, 刘承志, 等. 基于激光大气传输特性的卫星激光测距系统的最大探测距离 [J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0901003.
- [6] Cui P F, Yang L H, Lin J R, et al. Application of femtosecond optical frequency comb in precise absolute distance measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120011. 崔鹏飞, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 飞秒光学频率梳在精密绝对测距中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120011.
- [7] McCarthy A, Collins R J, Krichel N J, et al. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting [J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6241-6251.
- [8] Molebny V, McManamon P F, Steinvall O, et al. Laser radar: historical prospective—from the East to the West [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031220.
- [9] Zhu J, Chen X X, Huang P, et al. Thermal-light-based ranging using second-order coherence [J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4885-4890.
- [10] Xiao J J, Fang C, Han X C, et al. Distance ranging based on quantum entanglement [J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(10): 100301.
- [11] Boitier F, Godard A, Rosencher E, et al. Measuring photon bunching at ultrashort timescale by two-photon absorption in semiconductors [J]. Nature Physics, 2009, 5: 267-270.
- [12] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light [J]. Nature, 1956, 177(4497): 27-29.
- [13] Hanbury Brown R, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius [J]. Nature, 1956, 178(4541): 1046-1048.
- [14] Li M F, Mo X F, Zhang A N, et al. The key technics in

- quantum imaging and its researching status. [J]. Navigation and Control, 2016, 15(5): 1-9, 16.
- 李明飞, 莫小范, 张安宁. 量子成像关键技术及研究进展[J]. 导航与控制, 2016, 15(5): 1-9, 16.
- [15] Ferri F, Magatti D, Sala V G, et al. Longitudinal coherence in thermal ghost imaging [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(26): 261109.
- [16] Gatti A, Magatti D, Ferri F. Three-dimensional coherence of light speckles: theory [J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 063806.
- [17] Magatti D, Gatti A, Ferri F. Three-dimensional coherence of light speckles: experiment [J]. Physical Review A, 2009, 79(5): 053831.
- [18] Liu Y D, Wang J, Liang J W. Dynamic target pose measurement by laser tracking [J]. Laser & Infrared, 1999, 29(3): 148-151.
- 刘永东, 王佳, 梁晋文. 动态目标全姿态激光跟踪测量[J]. 激光与红外, 1999, 29(3): 148-151.